



# 基于SLDEM2015数据的月球Aristarchus地区有效太阳辐照度和电场实时模拟

甘红<sup>1,2,3\*</sup>, 魏广飞<sup>3,4</sup>, 王俊涛<sup>3</sup>, 曾小家<sup>3</sup>, 李雄耀<sup>3,4</sup>, 刘建忠<sup>3,4</sup>, 张小平<sup>2</sup>

1. 贵州理工学院分析测试中心, 贵阳 550003;

2. 澳门科技大学月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 999078;

3. 中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081;

4. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

\*联系人, E-mail: ganhong06@gmail.com

收稿日期: 2021-04-24; 接受日期: 2021-06-21; 网络出版日期: 2021-11-09

中国科学院战略性先导科技专项B类(编号: XDB41000000)、国家自然科学基金(编号: 41903058, 41931077, 41803052, 41704167, 11761161001)、澳门科学技术发展基金(编号: 020/2014/A1, 008/2017/AFJ, 0042/2018/A2)和贵州理工学院高层次人才科研启动经费(编号: XJGC20181290)资助项目

**摘要** 以月球Aristarchus地区为例, 基于覆盖全月的高精度数字高程模型(SLDEM2015)得到的月表坡度和方位角数据, 计算2025–2045年之间研究区处于近日点夏至/冬至、远日点夏至/冬至4个时间点时, 正午时刻的有效太阳辐照度. 其次, 基于充电电流平衡理论, 计算4个时间点对应的平衡表面电势和垂向电场强度. 研究发现地形、纬度、日月距离、季节对有效太阳辐照度和表面电场的分布特征具有重要的影响. 此外, 对比发现日月距离对研究区的有效太阳辐照和电场环境的影响比季节效应的影响更大. 这可为将来无人和载人月球探测任务的时间选择、着陆点环境特征模拟、太阳能利用、月表尘埃环境预警预报等提供一定的支撑和依据.

**关键词** 月球, Aristarchus地区, 有效太阳辐照度, 电场强度

**PACS:** 94.05.Bf, 95.55.Pe, 96.12.Wx, 96.60.Ub

## 1 引言

2020年12月16日, 嫦娥五号返回器携月球样品在内蒙古四子王旗预定区域安全着陆, 标志着我国首次地外天体采样任务圆满完成. 我国将持续推进嫦娥六、七、八号探测任务的开展, 最终实现月球极区探测、载人登月及月球基地建设. 未来十年, 全世界的月球探测任务计划累计达29次之多. 2020年9月, 美

国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)正式公布了“阿尔忒弥斯”(Artemis)月球探测计划. 该计划将于2021年开始运用机器人开展月球无人探测, 并于2024年实现美国宇航员重返月球, 这也是自1972年阿波罗17号登月以来的第一次载人登月. 俄罗斯将与欧洲空间局(European Space Agency, ESA)合作, 发射Luna 25–29, 最终实现月球样品采样返回. 印度、日本、英国等其他国家也都提出了月球探

**引用格式:** 甘红, 魏广飞, 王俊涛, 等. 基于SLDEM2015数据的月球Aristarchus地区有效太阳辐照度和电场实时模拟. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 239611  
Gan H, Wei G F, Wang J T, et al. Real-time simulation of effective solar irradiance and electric field on the Aristarchus region based on SLDEM2015 data (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 239611, doi: 10.1360/SSPMA-2021-0122

测计划, 比如印度的月船三号等. 未来十年月球探测任务的重点研究区域在于月球南极地区, 特别是永久阴影区内的水冰、挥发分、矿物等资源的探测. 月面有效太阳辐照的变化直接关系到水冰和挥发分的迁移和汇集. 对于中低纬地区, 一方面, 太阳辐照影响着月球表面及次表层热辐射特性; 另一方面, 从月表太阳能资源利用效率和光照条件复杂度来说, 靠近赤道或低纬度区域更有利于开展无人和载人探测.

在早期的研究中, 通常将太阳辐照度视为常量, 仅考虑太阳辐射随其入射角的余弦规律变化. 月球的地基和卫星遥感探测表明, 月表接收的太阳辐射和表面温度从赤道向两极呈余弦函数单调递减, 但受地形粗糙度(主要是密集分布的撞击坑)影响, 越是高纬地区, 光照环境越复杂. Bussey等人<sup>[1]</sup>分析了月球两极直径为20 km简单撞击坑的光照特征, 结果表明即使位于南纬70°的简单撞击坑也存在永久阴影区, 且季节对永久阴影区范围有影响, 冬季的永久阴影区范围比夏季多15%. 李雄耀等人<sup>[2]</sup>基于行星轨迹理论和光滑球面模型, 计算了1950–2050年期间月表太阳辐照度随日月距离、太阳入射角的实时变化, 但未考虑地形的影响. 2017年, 张吉栋等人<sup>[3]</sup>基于高精度月球轨道飞行器激光测高仪(Lunar Orbiter Laser Altimeter, LOLA)数据, 以Aristarchus高原(Aristarchus Plateau, AP)为例, 结合月球行星历表和月球天平动, 探讨了月面中低纬度地区光照特性, 并给出了1年、半个章动周期(9.3年)和一个章动周期(18.6年)内累积的光照率分布特征. 对于未来的月球探测任务, 除了长周期的光照特征, 实时的光照条件也很重要. 2019年, 甘红等人<sup>[4]</sup>以澄海的Banting撞击坑为例, 基于LOLA数据构建了简单撞击坑模型, 在同时考虑太阳直接辐照和坑壁二次反射的基础上, 探讨了不同地方时条件下撞击坑的有效太阳辐照的分布, 并计算了不同时刻撞击坑内的光照面积占比. 基于该简单撞击坑模型, 甘红等人<sup>[5]</sup>进一步讨论了嫦娥四号着陆区织女撞击坑的光照特征和电场特征, 两者之间呈良好的对应关系. 因为月表太阳辐射和等离子体轰击是产生月表静电场的主要因素, 特别是在光照区, 太阳辐照的影响占主导作用.

带电的(亚)微米级尘埃在电场力作用下, 克服重力和黏附力, 发生静电迁移. 这些浮扬的尘埃对载荷仪器(如光学镜头、机械构件、太阳能板等)产生一定的损害<sup>[6–8]</sup>, 同时给宇航员的生命健康带来潜在威

胁<sup>[9,10]</sup>. 因此, 准确预测和获取在未来时间段内随日月轨道参数变化(月表太阳直射点、日月距离、当地时)而表现出的月表静电场变化特征可为探讨月表带电尘埃的迁移规律、实现尘埃天气预警等提供关键的实时参考依据.

地球围绕太阳以椭圆轨道公转, 在近日点和远日点之间, 日地距离周期性变化. 月球自转且围绕地球公转, 其自转周期和公转周期同步, 但随着地球绕太阳公转以及月球绕地球公转, 日月距离随之变化. 由于月球赤道面相对于黄道面存在约1.54°的倾角, 即月球绕太阳公转时太阳直射点在月球1.54°N/S纬度间变化, 从而产生类似地球四季的“季节”效应. 这种效应在太阳辐射较弱的月球两极(包括永久阴影区)也可以明显观察到<sup>[11]</sup>. 对于将来的载人探测来说, 选择太阳辐照度较强的“季节”进行探测, 可以保证太阳能资源的最大化利用. 当然, 月表地形也是影响太阳辐照和电场分布的重要因素, 这也是本文探讨的重点之一.

为了清晰地对比月表太阳辐射和电场环境, 深入认识日月距离和“季节”变化对月表太阳辐射和电场环境的影响, 本文将以极端条件下(近日点/远日点、夏至/冬至)月面的有效太阳辐照度、平衡表面电势和电场强度的分布特征为代表进行探讨. 由于月球自转和公转同步, 月球正面始终朝向地球, 可保证良好的通讯路径, 因此本文优先选择位于月球正面中低纬的Aristarchus地区作为研究区, 分析2025–2045年期间研究区处于近日点夏至、近日点冬至、远日点夏至和远日点冬至时正午时刻太阳辐照和表面电场的分布特征, 并定量给出了随日月距离变化和“季节”变化, 有效太阳辐照度、平衡表面电势和电场强度的变化范围.

## 2 数据和方法

### 2.1 数据及Aristarchus地区地质背景

月球勘探轨道器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)搭载的月球轨道激光高度计(LOLA)自2009年发射在轨运行以来, 获得了超过65亿个月表高程测量点, 垂向精度达到0.1 m<sup>[12]</sup>. 由于LRO是极轨卫星, 轨道之间仍然无法完全重复覆盖, 尤其在赤道地区相邻轨道覆盖面之间的最大间距可达几千米, 显然无法满足局部区域的高精度光照条件分析. 日本在2007年

发射的月亮女神(SELENE或Kaguya),其搭载了激光高度计(Laser ALTimeter, LALT)和地形相机(Terrain Camera, TC).利用LALT获取了顺轨~1.6 km、交轨~15 km(赤道位置)的采样点数据<sup>[13]</sup>.此外,利用TC前向和后向相机可以获取地形的立体影像,从而获取地形信息,并计算得到覆盖全球99%的数字高程模型(DEM)<sup>[14]</sup>.Barker等人<sup>[12]</sup>进一步融合了LOLA数据和TC影像融合生成的DEM数据,获取了覆盖月球60°N/S纬度内的高精度数字高程模型(SELENE and LRO DEM 2015, SLDEM2015),其水平向分辨率可达到512像素/°(相当于赤道位置~60 m),垂向精度可达~3–4 m.

基于SLDEM2015数据,LOLA科学家团队进一步计算得到了相同分辨率的月表坡度和方位角数据(<http://imbrium.mit.edu/>),为进一步详细开展月表地形地貌特征研究提供了数据支撑.图1为月球正面30°N/S纬度范围内LRO广角相机(Wide Angle Camera, WAC)影像.黄色圆点表示该范围内NASA星座计划中重返月球项目推荐的优先探测目标<sup>[15]</sup>.本文将Aristarchus地区(黄色方框区域)为例详细探讨该区域的有效太阳辐照度和电场环境特征.

Aristarchus地区位于月球正面西北部雨海和风暴洋之间,图2(a)为Aristarchus地区的LRO WAC光学影像,对应图1中的黄色方框区域,图2(b)为Aristarchus地区的数字高程图,根据SLDEM2015数据得到.Aristarchus地区主要由Aristarchus高原组成,即图2(b)中近西北-东南方向的巨大长方形岩块(170 km×220 km),其

可能是在约38.5亿年前雨海盆地形成时隆起造成,整个Aristarchus高原被风暴洋的熔岩流所包围.区域内最高点位于两个最大撞击坑和Schröteri月溪源头所围成的区域内,最低点位于Aristarchus撞击坑内,整体向西北方向倾斜,与Schröteri月溪上游走向基本一致.Aristarchus高原西北方向低,但西北边缘仍比周围风暴洋高出约2 km.

月球正面月海区域保留了丰富的火山地貌<sup>[16]</sup>,Aristarchus地区是月表最大的火山碎屑沉积区域之一,表面主要被黑色和微红色的火山碎屑玻璃覆盖,厚度可达10–30 m,经历了漫长的空间风化过程,其光学成熟度与周围月海地区相当<sup>[17]</sup>,所以总体反照率较低(平均值为0.187).位于高原东南边缘的Aristarchus撞击坑是该区域最大的撞击坑,直径约40 km,保存完整.该撞击坑挖掘出大量的深部物质,是月球上反照率最大的撞击坑之一,中央峰出露大量的斜长岩,而周围的溅射物主要是高地物质、月海物质和撞击熔融物形成的混合物,撞击坑表面还包含大量的橄榄石<sup>[18]</sup>.此外,以Aristarchus撞击坑为中心,富Th的KREEP成分覆盖了整个高原<sup>[17]</sup>.除了Aristarchus撞击坑,其他区域下覆物主要为月海玄武岩.邻近的Herodotus撞击坑比Aristarchus撞击坑略小,坑内被熔岩覆盖,地形相对平坦;而研究区内的其他小型撞击坑则未挖掘出深部的高地物质.此外,整个Aristarchus高原多条蜿蜒的月溪集中分布,特别是位于中央位置的Schröteri月溪是月球上规模最大的月溪.Schröteri月溪起源于一

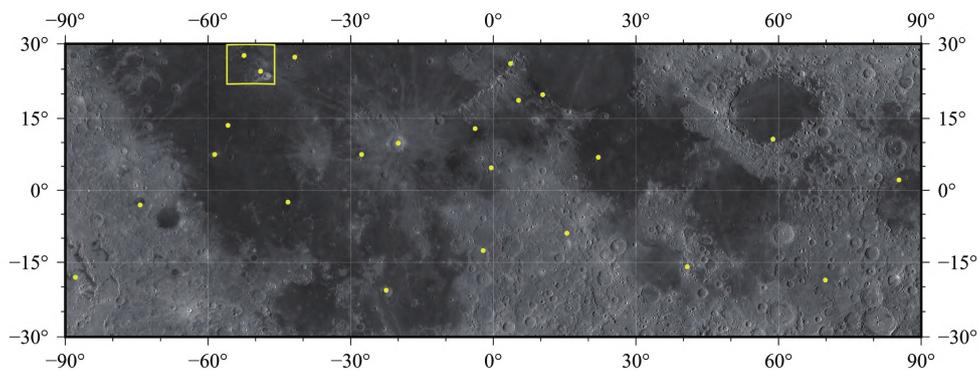


图1 (网络版彩图)月球正面30°N/S范围内LRO WAC光学影像.黄色点表示NASA星座计划重返月球项目的优先探测目标.黄色方框为Aristarchus地区.注:光学影像分辨率为16 ppd,数据来源于<https://www.lroc.asu.edu/>

Figure 1 (Color online) LRO WAC optical image of the lunar nearside in the range of 30°N/S. The yellow dots represent high priority lunar exploration sites in NASA's Constellation program for returning to the Moon. The yellow box is the Aristarchus region. Note: The optical image resolution is 16 ppd, and the data are obtained by <https://www.lroc.asu.edu/>.

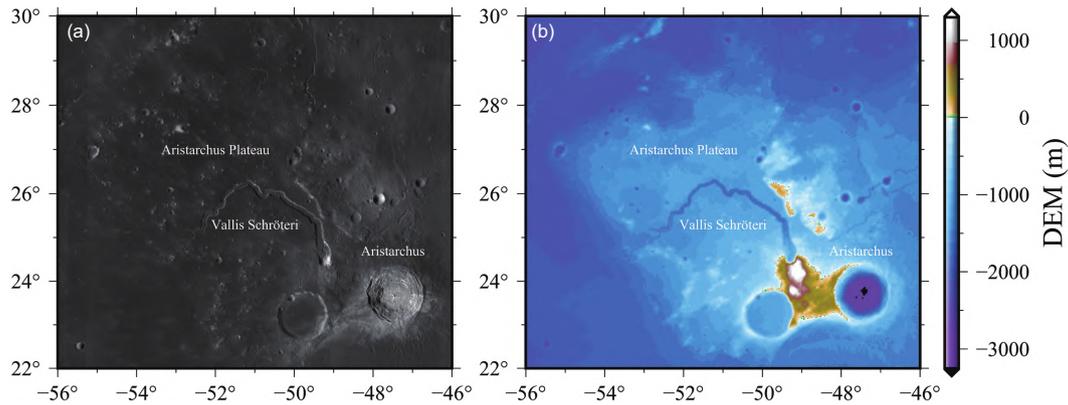


图2 (网络版彩图) Aristarchus地区的LRO WAC光学影像(a)和数字高程图(b). 该区域对应图1中黄色方框. 高程数据来源于<http://imbrium.mit.edu/>

Figure 2 (Color online) (a) LRO WAC optical image and (b) topographic map of the Aristarchus region. This area corresponds to the yellow box in Figure 1. The elevation data are obtained by <http://imbrium.mit.edu/>.

个直径约6 km的撞击坑, 熔岩流从近正北方向转向西北方向延伸, 后折回西南方向至Aristarchus高原边缘. 月溪两侧坡度较陡, 主要由月海玄武岩组成. 总之, Aristarchus地区物质类型丰富, 地质条件复杂, 是月球形成与演化研究的重点区域之一.

## 2.2 轨道参数

准确预测未来一定时间段内日-月系统的天文参数是计算月表有效太阳辐照度( $I_s$ )的关键. 图3为2025年1月1日至2045年12月31日期间的月表太阳赤纬和日月距离, 时间分辨率为一个地球日. 日-月系统的轨道星历参数是基于WebGeocal (WGC)工具计算得到. WGC提供了一个基于网页交互界面的可以调用SPICE (即Spacecraft, Planet, Instrument, Camera-matrix, Events)系统进行天文观测几何在线计算的工具(<https://naif.jpl.nasa.gov/naif/webgeocalc.html>). 图3(a)可以看到, 虽然月球赤道面相对黄道面的倾角很小(平均约 $1.54^\circ$ ), 但太阳赤纬( $\delta$ )仍表现出明显的“季节性”波动, 即月表太阳直射点在月球赤道附近回归运动. 月表接收到的太阳辐射能量和月表温度也随之表现出一定的季节性变化. 比如, 月球勘探轨道器(LRO)搭载的Diviner辐射实验仪获取了10年以上的覆盖全月的热红外观测数据, Williams等人<sup>[11]</sup>通过太阳星下点的回归历史对Diviner热辐射数据进行重新划分, 得到了月球极区因“季节”变化呈现显著的温度差异. 此外, 月球运行轨道受太阳、地球同时影响而变化, 在相同时

间段内日月距离( $D_{sm}$ )也表现出规律性的变化, 如图3(b)所示.

为了进一步探讨因月球季节性变化和日月距离变化引起的月表有效太阳辐照度和电场环境的改变, 首先选取了太阳直射点所在经度位于 $-56^\circ$ 至 $-46^\circ$ 之间的数据, 即研究区内与太阳直射点同经度的区域此时正处于正午时刻, 其他区域则在11:20–12:40 LT范围. 其次, 对太阳赤纬和日月距离分别进行归一化, 并根据即将探讨的4个条件, 近日点夏至(Perihelion Summer Solstice, PSS)、远日点夏至(Aphelion Summer Solstice, ASS)、近日点冬至(Perihelion Winter Solstice, PWS)和远日点冬至(Aphelion Winter Solstice, AWS), 选取4个时间点. 选取原则满足:

$$f = \left[ \left( \frac{\delta - \delta_i}{\delta_{\max} - \delta_{\min}} \right)^2 + \left( \frac{D_{sm} - D_{smj}}{D_{sm\max} - D_{sm\min}} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

其中,  $\delta_{\max}$ 和 $\delta_{\min}$ 分别为2025年1月1日至2045年12月31日期间最大和最小太阳赤纬;  $D_{sm\max}$ 和 $D_{sm\min}$ 分别为该时间段内的最大和最小日月距离. 选取夏至时,  $i = \max$ , 选取冬至时,  $i = \min$ ; 选取近日点时,  $j = \min$ , 选取远日点时,  $j = \max$ . 在4种不同条件下, 因子 $f$ 最小时即为最佳时间点, 根据这一原则我们选择了如表1所示的4个时间点. 具体的太阳直射点经度、 $\delta$ 和 $D_{sm}$ 等参数已在表1中给出. 直射点经度最大差值为 $6.46^\circ$ , 即存在不超过25.83 min (相对于当地时)的时差, 可忽略不计.

图3直观地给出了4个时间点对应的太阳赤纬和

日月距离. 其中, 圆点代表月球北半球临近“夏至”, 三角形则代表月球北半球临近“冬至”; 红色的符号表示实际日月距离接近日月距离最小值, 蓝色的符号则表示日月距离接近最大值. 由图 3可知, 蓝色三角形为2033年7月16日, 指示远日点冬至; 红色圆点为2034年12月30日, 指示近日点夏至; 蓝色圆点为2042年7月7日, 指示远日点夏至; 红色三角形为2042年12月31日, 指示近日点冬至. 需要注意的是, 由于月球本身的公转和自转规律, 上述4个时间点未能与月球的夏至日、冬至日完全重合, 但对于拟探讨的季节和日月距离对月表光照环境和电场环境的影响不大.

### 2.3 研究方法

#### (1) 太阳辐照

月表太阳辐射总体表现出从太阳直射点向两极及晨昏线递减的趋势, 而局部地形的起伏, 如撞击坑地形, 对接收到的有效太阳辐射具有直接的影响. 因此, 局部地形特征是影响其热辐射特性和电场环境的重要因素, 进而关系着未来载人/无人着陆探测中的太阳能资源利用以及局部尘埃等离子体环境的风险等级评

估. 在前期研究中, 我们采用数值模拟的方法构建了月表简单撞击坑模型, 并计算了坑内和周边区域的有效太阳辐照度和电场环境<sup>[4,5]</sup>. 这里我们基于高精度的月表地形数字高程模型数据SLDEM2015, 采用类似的方法计算Aristarchus高原任意位置坡度的局部太阳高度角( $\beta_s$ ), 即局部太阳高度角可表示为<sup>[19]</sup>

$$\sin \beta_s = \cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta \cos(\Delta \alpha), \quad (2)$$

其中,  $\alpha$ 为坡度,  $\Delta \alpha$ 为太阳方位角和坡面方位角的差值,  $\beta$ 为水平面的太阳高度角(不考虑月面地形).  $\beta$ 可进一步表示为

$$\sin \beta = \cos \lambda \cos \delta \cos h + \sin \lambda \sin \delta, \quad (3)$$

其中,  $\lambda$ 为纬度,  $h$ 为时角. 注意, 以上角度均为弧度制.

表 1 四个时间点的太阳直射点经纬度、日月距离等参数

时间 (UTC)	经度 (°)	$\delta$ (°)	$D_{sm}$ (AU)	符号
2033-07-16 00:00:00	-48.68	-1.51	1.02	AWS
2034-12-30 00:00:00	-53.95	1.43	0.98	PSS
2042-07-07 00:00:00	-49.67	1.52	1.02	ASS
2042-12-31 00:00:00	-47.49	-1.56	0.98	PWS

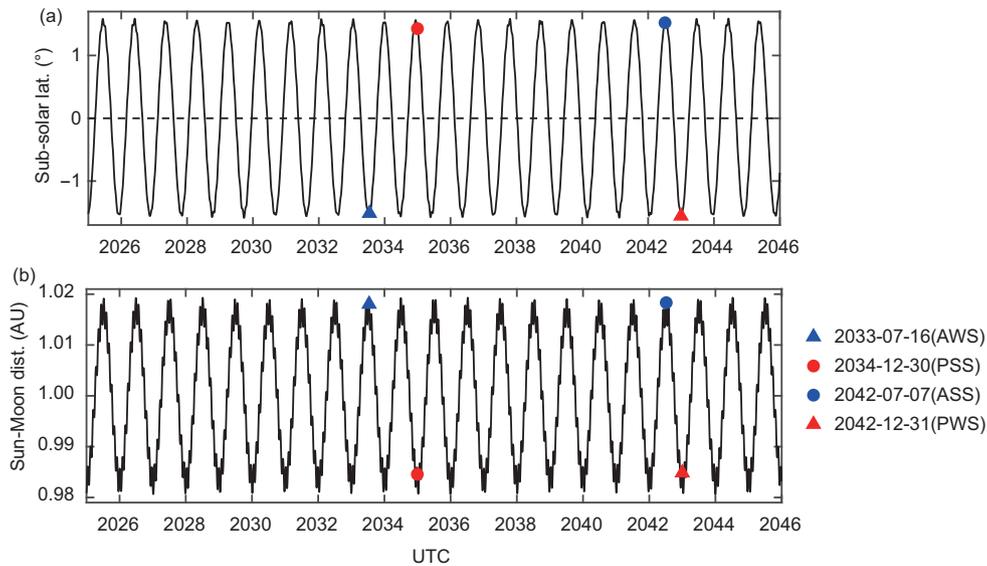


图 3 (网络版彩图) 2025年1月1日至2045年12月31日期间月表太阳赤纬(a)和日月距离(b)随时间的变化. 蓝色三角形、红色圆形、蓝色圆形和红色三角形分别表示远日点冬至、近日点夏至、远日点夏至和近日点冬至. (a)中虚线表示月球赤道, 季节取决于月表太阳赤纬

Figure 3 (Color online) Sub-solar latitude on the Moon (a) and Sun-Moon distance (b) from January 1, 2025 to December 31, 2045. The blue triangle, red circle, blue circle, and red triangle represent AWS, PSS, ASS and PWS, respectively. The dotted line in (a) indicates the lunar equator and the season depends on the sub-solar latitude.

当研究区处于正午时刻时, 区域内任意位置的太阳高度角 $\beta$ 在 $57^\circ-70^\circ$ 之间, 以至于地形之间的相互遮挡并不显著, 但可能存在一定的自身遮蔽效应. 受地形影响, 任意位置的局部太阳高度角 $\beta_s$ 则具有更大的变化范围. 当 $\sin\beta_s \leq 0$ 时, 表示太阳位于局部坡面延伸的无限平面以下, 即坡面产生了自身遮蔽效应, 此时坡面接收的有效太阳辐照度( $I_s$ )为0. 当 $\sin\beta_s > 0$ 时, 局部坡面接收的有效太阳辐照度( $I_s$ )可表示为

$$I_s = \frac{(1-A)S \sin\beta_s}{D_{sm}^2}, \quad (4)$$

其中,  $A$ 为表面反照率(Aristarchus地区平均反照率0.187),  $S$ 为太阳常数, 给定 $1365 \text{ W m}^{-2}$ .

## (2) 月表充电

在近月表空间环境中, 月表物质充电, 并产生全球性静电场. 由于日地月三者之间的位置关系变化, 70%的月球轨道处于太阳风中. 以典型的慢太阳风环境为例, 对于月球光照区, 太阳紫外、X射线诱发的尘埃光电子发射充电占主导, 入射到月表的低能量等离子体电子和离子附着到尘埃颗粒表面, 但不足以激发二次电子, 因此二次电子发射电流可忽略, 即 $J_s = 0$ , 同样地, 忽略等离子体电子和离子的反射、散射等. 即在月球光照区, 月面充电电流主要由光电子电流( $J_{ph}$ )、等离子体电子电流( $J_e$ )和等离子体离子电流( $J_i$ )组成, 月表以带正电为主. 相对于太阳风质子产生的电流, 正离子产生的电流可忽略, 因此,  $J_i$ 主要指太阳风质子电流. 基于电流平衡理论, 当月面充电电流达到平衡时, 即 $dQ/dt = 0$ , 月表静电势达到稳定. 在光照区, 光电子电流占主导,  $|J_{ph}| \gg |J_e| \gg |J_i|$ , 忽略 $J_i$ , 当 $J_{ph} + J_e = 0$ 时, 达到电流平衡.

在典型的慢太阳风中, 太阳风的整体运动速度( $V$ )约为 $400 \text{ km s}^{-1}$ , 等离子体电子温度( $T_e = 1.4 \times 10^5 \text{ K}$ )和等离子体离子温度( $T_i = 1.0 \times 10^5 \text{ K}$ )相当, 但由于电子质量( $m_e$ )远小于质子质量( $m_i$ )导致电子热运动速度( $v_{te} = 2060 \text{ km s}^{-1}$ )远大于离子的热运动速度( $v_{ti} = 44.5 \text{ km s}^{-1}$ ). 那么, 太阳风整体运动速度介于两者之间,  $v_{te} \gg V \gg v_{ti}$ , 这表明电子以热运动为主, 离子以太阳风整体运动为主, 可视为单能离子束注入. 但是, 由于光照区离子电流远小于光电子电流和电子电流, 因此此处忽略 $J_i$ 的贡献.

根据Stubbs等人<sup>[20]</sup>的分析模型, 在光照区, 当月面初始电势 $\phi_0 > 0$ 时, 光电子和等离子体电子受月面

电场吸引, 月面的光电子电流和等离子体电子电流分别为

$$J_{ph} = -en_{ph0} \left( \frac{k_B T_{ph}}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{e\phi_0}{k_B T_{ph}}\right), \quad (5)$$

$$J_e = en_0 \left( \frac{k_B T_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

其中,  $k_B$ 为Boltzmann常数( $1.38 \times 10^{-23}$ ),  $e$ 为元电荷( $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ),  $m_e$ 表示电子质量( $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ),  $T_{ph}$ 为光电子温度( $1.7 \times 10^4 \text{ K}$ ).  $n_0$ 为无穷远处(即德拜鞘外)的等离子体浓度( $10.0 \text{ cm}^{-3}$ ), 而 $n_{ph0}$ 则为月表的光电子浓度, 与太阳的入射角度有关, 可表示为

$$n_{ph0} = -\left( \frac{2\pi m_e}{k_B T_{ph}} \right)^{1/2} \frac{J_{ph0} \cos\chi}{e D_{sm}^2}, \quad (7)$$

其中,  $J_{ph0}$ 为月表太阳垂直入射点的光电子电流密度( $-4.5 \mu\text{A m}^{-2}$ ),  $\chi$ 为局部太阳入射角, 与局部太阳高度角 $\beta_s$ 之间满足 $\chi + \beta_s = \pi/2$ . 当充电平衡时, 月面电势由 $\phi_0$ 变为 $\phi_s$ . 通过光照区电流平衡方程 $J_{ph} + J_e = 0$ , 可求解月面平衡电势:

$$\phi_s = -\frac{k_B T_{ph}}{e} \ln\left(-\frac{en_0 D_{sm}^2}{J_{ph0} \cos\chi} \sqrt{\frac{k_B T_e}{2\pi m_e}}\right). \quad (8)$$

在光照区, 当月面初始电势 $\phi_0 < 0$ 时, 光电子和等离子体电子受月面电场排斥, 月面的光电子电流和等离子体电子电流分别为

$$J_{ph} = -en_{ph0} \left( \frac{k_B T_{ph}}{2\pi m_e} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

$$J_e = en_0 \left( \frac{k_B T_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \exp\left(\frac{e\phi_0}{k_B T_e}\right). \quad (10)$$

当月面电势由 $\phi_0$ 变为 $\phi_s$ , 达到充电平衡, 即 $J_{ph} + J_e = 0$ . 此时, 月面平衡电势为

$$\phi_s = \frac{k_B T_e}{e} \ln\left(-\frac{J_{ph0} \cos\chi}{en_0 D_{sm}^2} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{k_B T_e}}\right). \quad (11)$$

对于 $\phi_s < 0$ 和 $\phi_s > 0$ 的临界点, 月面电势为0, 即所谓的“盲区”(Dead Zone). 通过式(8)或(11), 可知盲区所在位置的局部太阳入射角( $\chi_{DZ}$ )为

$$\chi_{DZ} = \cos^{-1}\left[-\frac{en_0 D_{sm}^2}{J_{ph0}} \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m_e}\right)^{1/2}\right]. \quad (12)$$

当 $\chi < \chi_{DZ}$ 时, 月面平衡电势为正,  $\phi_s > 0$ ; 当 $\chi > \chi_{DZ}$ 时, 月面平衡电势为负,  $\phi_s < 0$ .

由于地形遮挡,即使在正午(12:00 LT),也可能存在带负电的局部区域.受月面地形遮挡,等离子体粒子被向阳坡接收,从而在背阳坡的阴影区中形成等离子体空洞,等离子体粒子通过回旋运动、双极膨胀等填充空洞,即产生尾迹效应.对于坡度为 $\alpha$ 的背阳坡,若 $\beta + \theta_i < \alpha$  ( $\theta_i$ 为等离子体离子偏转角),等离子体离子不能到达阴影区,仅等离子体电子可到达,从而形成电子云区,电子不断累积产生极强的负电势电场,电流平衡通过等离子体电子电流和尘埃电流等实现;当 $\beta + \theta_i > \alpha$ 时,等离子体电子和离子均能到达阴影区并实现电流平衡<sup>[21,22]</sup>.Aristarchus地区的地形坡度主要集中在 $6^\circ$ 以内,平均值为 $5.11^\circ$ ,撞击坑坑壁和月溪壁可达到 $30^\circ$ 以上,极个别位置可达到 $70^\circ$ .但当研究区处于正午时刻时,太阳高度角 $\beta$ 介于 $57^\circ$ – $70^\circ$ 之间,满足 $\beta + \theta_i > \alpha$ ,即在背阳坡的阴影区不存在电子云区,亦不会形成强烈的负电势电场,等离子体电子和离子的附着带电占主导.即对于地形遮挡的阴影区, $J_{ph} = 0$ ,当 $J_e + J_i = 0$ 时,达到电流平衡.此时,阴影区内,等离子体离子的运动可简单视为热运动为主,忽略尾迹效应影响.

在地形遮挡的阴影区,月面初始电势 $\phi_0 < 0$ ,等离子体电子受月面电场排斥,电子电流由式(10)给出,等离子体离子受月面电场吸引,离子电流为

$$J_i = -en_0 \left( \frac{k_B T_i}{2\pi m_i} \right)^{1/2}, \quad (13)$$

其中, $m_i$ 为离子质量( $1.67 \times 10^{-27}$  kg,假设全部为质子).忽略尾迹效应,当 $J_e + J_i = 0$ 时,月面达到平衡表面电势 $\phi_s$ .根据式(10)和(13)求解 $\phi_s$ 为

$$\phi_s = \frac{k_B T_e}{e} \ln \left( \sqrt{\frac{m_e T_i}{m_i T_e}} \right). \quad (14)$$

带电的月球表面受近月表的光电子、等离子体电子和离子屏蔽,形成全球性的德拜鞘.我们假设等离子体离子构成密度均匀的正电背景,月面电场的屏蔽主要通过光电子和等离子体电子的吸引或排斥实现.那么德拜鞘高度可表示为

$$\lambda_D = \left[ \frac{\epsilon_0 k_B T_{ph}}{e^2 (n_{ph0} + n_0 T_{ph}/T_e)} \right]^{1/2}, \quad \phi_s > 0, \quad (15)$$

$$\lambda_D = \left( \frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_0 e^2} \right)^{1/2}, \quad \phi_s < 0, \quad (16)$$

其中, $\epsilon_0$ 为真空介电常数( $8.85 \times 10^{-12}$  F/m).本文仅考虑月面垂向电场,假设月面平衡电势从月表向德拜鞘边界单调递减,那么月表垂向电场强度为 $E_s = \phi_s / \lambda_D$ .

## 3 结果

### 3.1 有效太阳辐照度

根据地方时(太阳直射点经度)、月球北半球季节(太阳赤纬)和日月距离,我们从2025–2045年期间选取了4个时间点,分别代表月球北半球处于远日点冬至、近日点夏至、远日点夏至和近日点冬至,并计算Aristarchus地区在4个时间点正午时刻的有效太阳辐照度.图4中(a), (b), (d), (e)分别代表月球北半球处于PSS, PWS, ASS, AWS时,研究区正午时刻(~12:00 LT)的有效太阳辐照度分布.4个时间点的有效太阳辐照度分别集中在 $0$ – $1310$ ,  $0$ – $1309$ ,  $0$ – $1224$ 和 $0$ – $1225$   $W m^{-2}$ 范围,显然,因地形遮挡,即使在正午时刻也存在局部区域不能接收太阳辐照.研究区共计超过 $2 \times 10^7$ 个像素点,而图4(a), (b), (d), (e)中太阳辐照度为0的像素点分别仅有6, 9, 6, 9个,这意味着99.99%以上的区域为光照区,自身遮蔽效应并不显著.注意,图4(a), (b), (d), (e)中黑色区域表示有效太阳辐照度低于 $1050$   $W m^{-2}$ ,而非阴影区.

在4个时间点,Aristarchus地区的平均有效太阳辐照度分别为1179, 1149, 1103和1075  $W m^{-2}$ .由此可知,近日点的有效太阳辐照度显著高于远日点,而季节的影响很小,夏至时略高于冬至.其次,对于任一时间点,研究区的有效太阳辐照度随纬度的增加而减少,即存在明显的纬度效应.此外,撞击坑、月溪等地形对有效太阳辐照度影响也很显著,如Aristarchus撞击坑南部坑沿外侧、北部坑壁的有效太阳辐照度显著高于周围区域,且在南部坑壁达到最小值.

为了认识季节对有效太阳辐照度的影响,我们计算了月球处于近日点和远日点,月球北半球夏至与冬至时研究区的有效太阳辐照度差值( $\Delta I_s$ ),如图4(c)和(f)所示,其中图4(c)为PSS与PWS之间的差值,图4(f)则为ASS与AWS之间的差值.图4(c)和(f)中的 $\Delta I_s$ 表现出明显的纬度效应,纬度越高的地区,差值越大,且受月表地形影响显著;其次,当月球处于近日点时的有效太阳辐照度季节差异范围( $-54.7$ – $67.8$   $W m^{-2}$ )略大

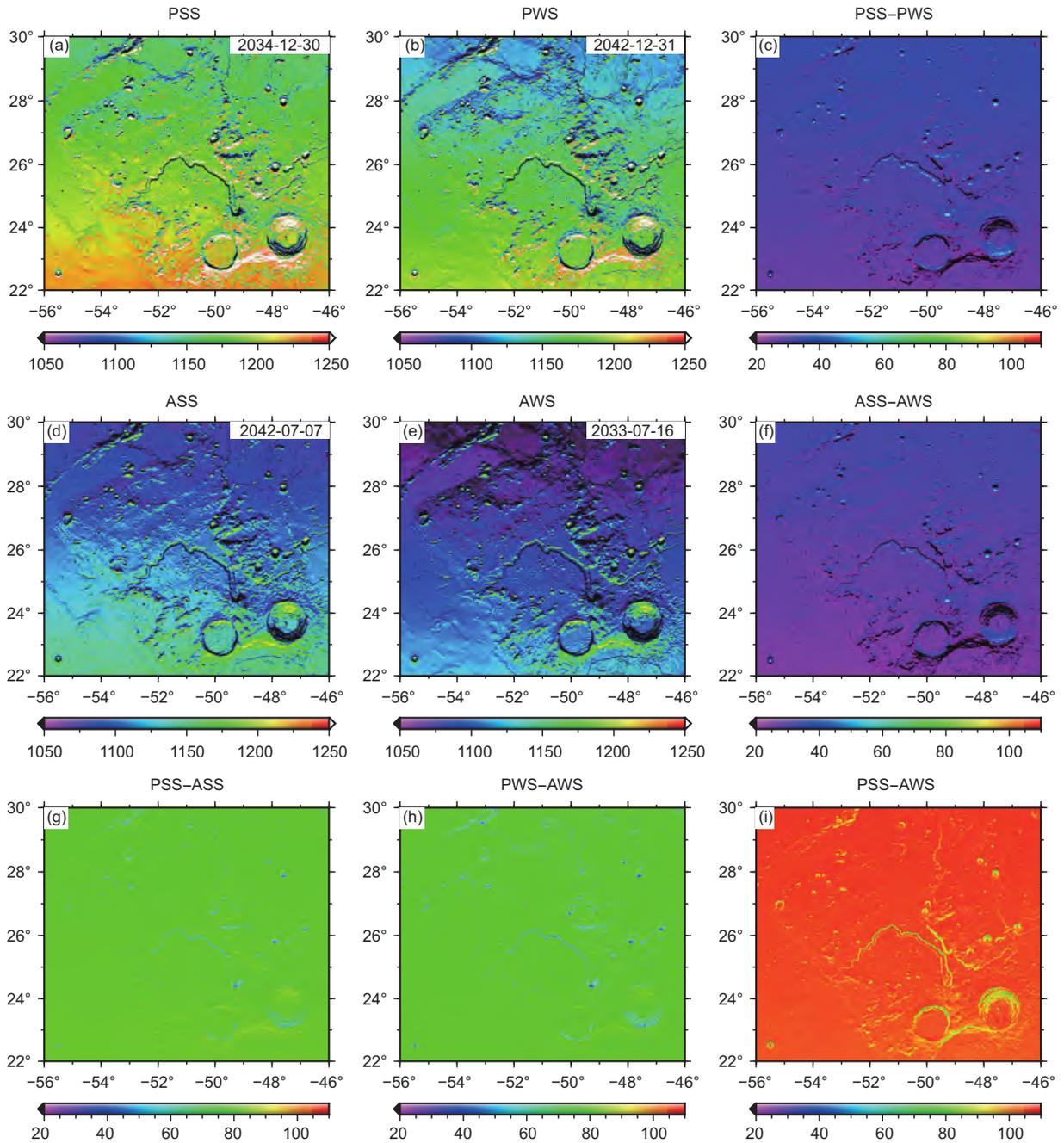


图4 (网络版彩图) Aristarchus地区正午时刻有效太阳辐照度分布(a) PSS, (b) PWS, (d) ASS, (e) AWS及有效太阳辐照度差值分布(c) PSS-PWS, (f) ASS-AWS, (g) PSS-ASS, (h) PWS-AWS, (i) PSS-AWS (单位:  $W m^{-2}$ )

Figure 4 (Color online) Distribution of effective solar irradiance at (a) PSS, (b) PWS, (d) ASS, (e) AWS and distribution of effective solar irradiance difference from (c) PSS-PWS, (f) ASS-AWS, (g) PSS-ASS, (h) PWS-AWS, (i) PSS-AWS at noon in the Aristarchus region (unit:  $W m^{-2}$ ).

于月球处于远日点时( $-53.0-64.3 W m^{-2}$ ). 图5给出了 $\Delta I_s$ 的分布范围曲线, 其中, 蓝色曲线为近日点时研究区夏至的有效太阳辐照度与冬至时的差异, 对应图

4(c), 橙色曲线则为远日点时的 $\Delta I_s$ , 对应图4(f). 由图5可知, 图4(c)的 $\Delta I_s$ 高于图4(f), 相应的 $\Delta I_s$ 平均值分别为30.5和27.6  $W m^{-2}$ .

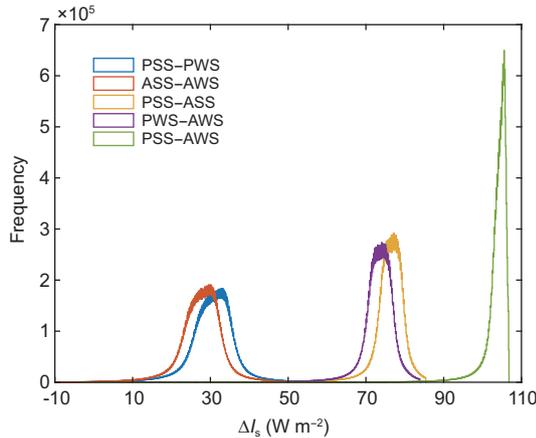


图5 (网络版彩图) Aristarchus地区正午时刻有效太阳辐照度差值分布

Figure 5 (Color online) Distribution of effective solar irradiance difference at noon in the Aristarchus region.

为了认识日月距离对有效太阳辐照度的影响,图4(g)和(h)给出了月球北半球处于夏至和冬至时,研究区近日点与远日点的有效太阳辐照度差值分布,其中图4(g)为PSS与ASS之间的差值,图4(h)为PWS和AWS之间的差值.由图4(g)和(h)可知,月球北半球处于夏至和冬至时,日月距离变化所致的 $\Delta I_s$ 分布相对均一,即未发现明显的纬度效应,但受月面地形影响.月球北半球夏至和冬至时,日月距离变化引起研究区的有效太阳辐照度差异( $\Delta I_s$ )范围分别为0–85.4和0–83.9  $\text{W m}^{-2}$ .由图5可知,夏至时,近日点和远日点的有效太阳辐照度差异(黄色曲线)略高于冬至(紫色曲线),其对应的 $\Delta I_s$ 平均值分为76.0和73.2  $\text{W m}^{-2}$ .此外,黄色和紫色曲线分布相比蓝色和橙色曲线分布更集中,这意味着日月距离不同所致的 $\Delta I_s$ ,其分布范围相比于季节差异所致的更加集中,这种差异是因为不同太阳入射角条件下,地形和纬度效应导致局部区域照明条件发生明显变化,比如背阳坡的阴影区面积增加或减少,从而引起局部区域的 $I_s$ 显著变化.

总体而言,日月距离对研究区有效太阳辐照度的影响显著高于季节的影响,且近日点的有效太阳辐照度普遍高于远日点,但在季节、地形等因素的共同影响下,局部区域冬至的有效太阳辐照度高于夏至,甚至太阳辐照区域发生改变.为了进一步分析Aristarchus地区的有效太阳辐照度变化尺度,图4(i)给出了近日点夏至与远日点冬至的有效太阳辐照度

差异,即PSS–AWS.因为PSS和AWS的有效太阳辐照度分别指示了研究区的最大有效太阳辐照度和最小有效太阳辐照度.由图4(i)可知,整个Aristarchus地区的 $\Delta I_s$ 相对均一,但是可见显著的月表地形影响.图5中绿色曲线给出了 $\Delta I_s$ 分布特征, $\Delta I_s$ 的分布范围为–3.0–106.8  $\text{W m}^{-2}$ ,且主要集中在102–106.8  $\text{W m}^{-2}$ 范围,其平均值为103.7  $\text{W m}^{-2}$ .此外,我们计算了2025年1月1日至2045年12月31日期间,Aristarchus地区所有正午时刻的有效太阳辐照度分布,详见附件一.

### 3.2 表面电场

基于Stubbs等人<sup>[20]</sup>的分析模型,我们探讨了Aristarchus地区的表面电场分布,图6和7分别给出了研究区平衡表面电势和垂向电场强度的分布.图6(a), (b), (d)和(e)分别代表PSS, PWS, ASS和AWS时,研究区正午时刻(~12:00 LT)的平衡表面电势分布.图7(a), (b), (d)和(e)则分别代表PSS, PWS, ASS和AWS时,研究区正午时刻(~12:00 LT)的垂向电场强度分布.由图可知,夏至的平衡表面电势和电场强度略高于冬至,近日点的平衡表面电势和电场强度显著高于远日点;同一时刻,平衡表面电势和电场强度分布具有纬度效应,即随纬度增加,平衡表面电势和电场强度减小;平衡表面电势和电场强度分布同时受地形因素影响,比如撞击坑、月溪等地形的向阳侧平衡表面电势和电场强度为正,且高于周围区域,特别是撞击坑的南部坑沿外侧和北部坑壁.

具体而言,在PSS, PWS, ASS和AWS四个时间点,研究区的平衡表面电势分布范围分别为–47.34–2.35, –47.34–2.35, –47.34–2.25和–47.34–2.26 V;对应的电场强度分布范围分别为–5.80–3.14, –5.80–3.14, –5.80–2.91和–5.80–2.91  $\text{V m}^{-1}$ .对于不能接收太阳辐照的区域及局部太阳入射角大于 $\chi_{\text{DZ}}$ 的区域,平衡表面电势和电场强度为负,但是这类型的区域在Aristarchus地区仅占极小部分,比如图6(a), (b), (d)和(e)中 $\phi_s < 0$ 的像素点分别仅有18, 20, 18, 23个,占研究区总面积不足万分之一;图7(a), (b), (d)和(e)中 $E_s < 0$ 的像素点同上.Aristarchus地区99.99%以上的区域带正电,在图6中,研究区的平衡表面电势高于2 V的区域均占85%以上,其中图6(a)甚至都高达97%.图6(a), (b), (d)和(e)的平

均平衡表面电势分别为2.20, 2.16, 2.10和2.06 V; 对应地, 在图 7(a), (b), (d)和(e)中, 研究区的平均垂向电场强度分别为2.79, 2.70, 2.58和2.50 V m<sup>-1</sup>.

图6和7中, (c)和(f)分别给出了PSS-PWS和ASS-AWS得到的 $\Delta\phi_s$ 和 $\Delta E_s$ , 指示不同日月距离时, 季节对平衡表面电势和垂向电场强度的影响; (g)和(h)分别给

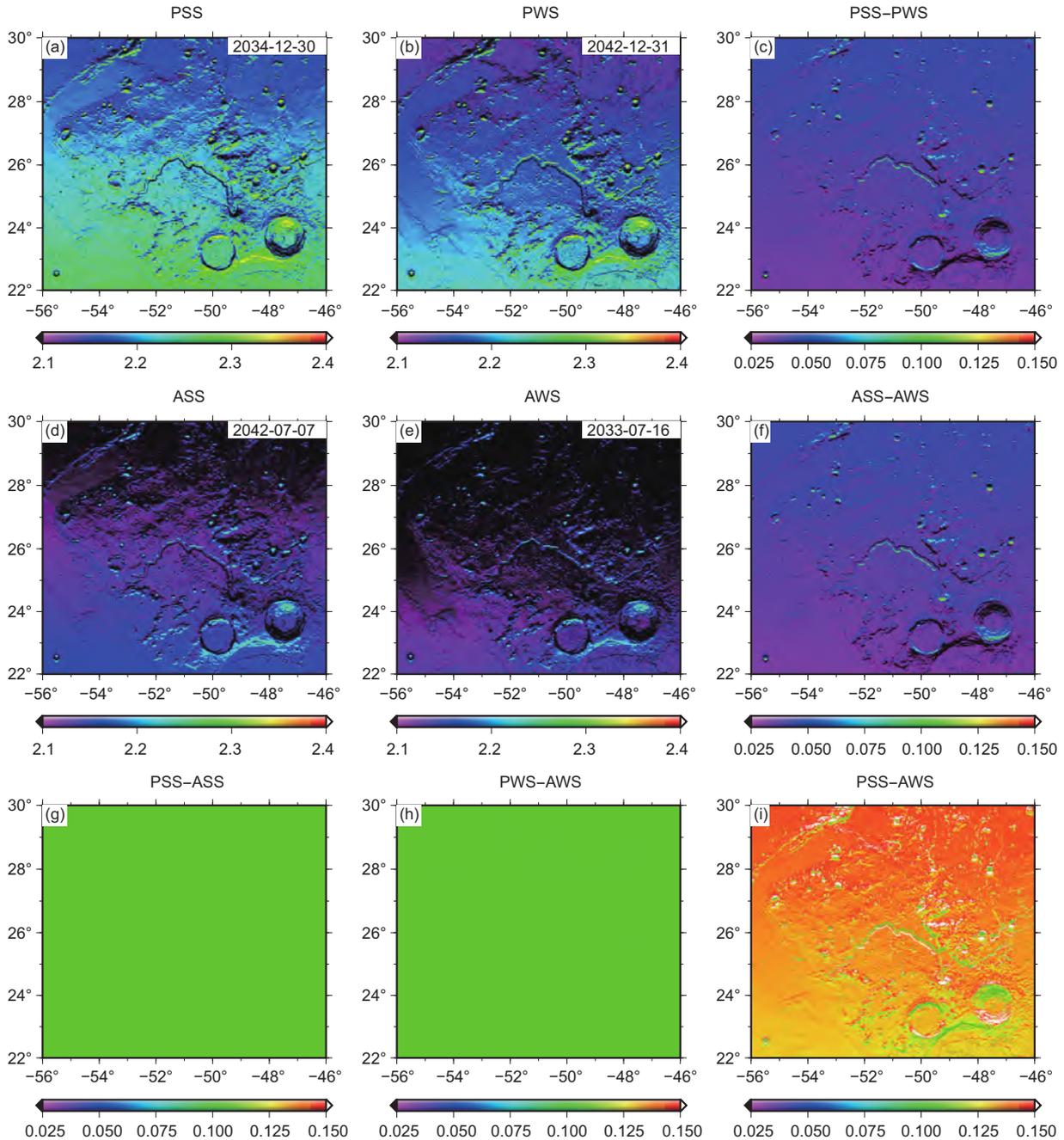


图 6 (网络版彩图) Aristarchus地区正午时刻平衡表面电势分布(a) PSS, (b) PWS, (d) ASS, (e) AWS及平衡表面电势差值分布(c) PSS-PWS, (f) ASS-AWS, (g) PSS-ASS, (h) PWS-AWS, (i) PSS-AWS (单位: V)

Figure 6 (Color online) Distribution of equilibrium surface potential at (a) PSS, (b) PWS, (d) ASS, (e) AWS and distribution of equilibrium surface potential difference from (c) PSS-PWS, (f) ASS-AWS, (g) PSS-ASS, (h) PWS-AWS, (i) PSS-AWS at noon in the Aristarchus region (unit: V).

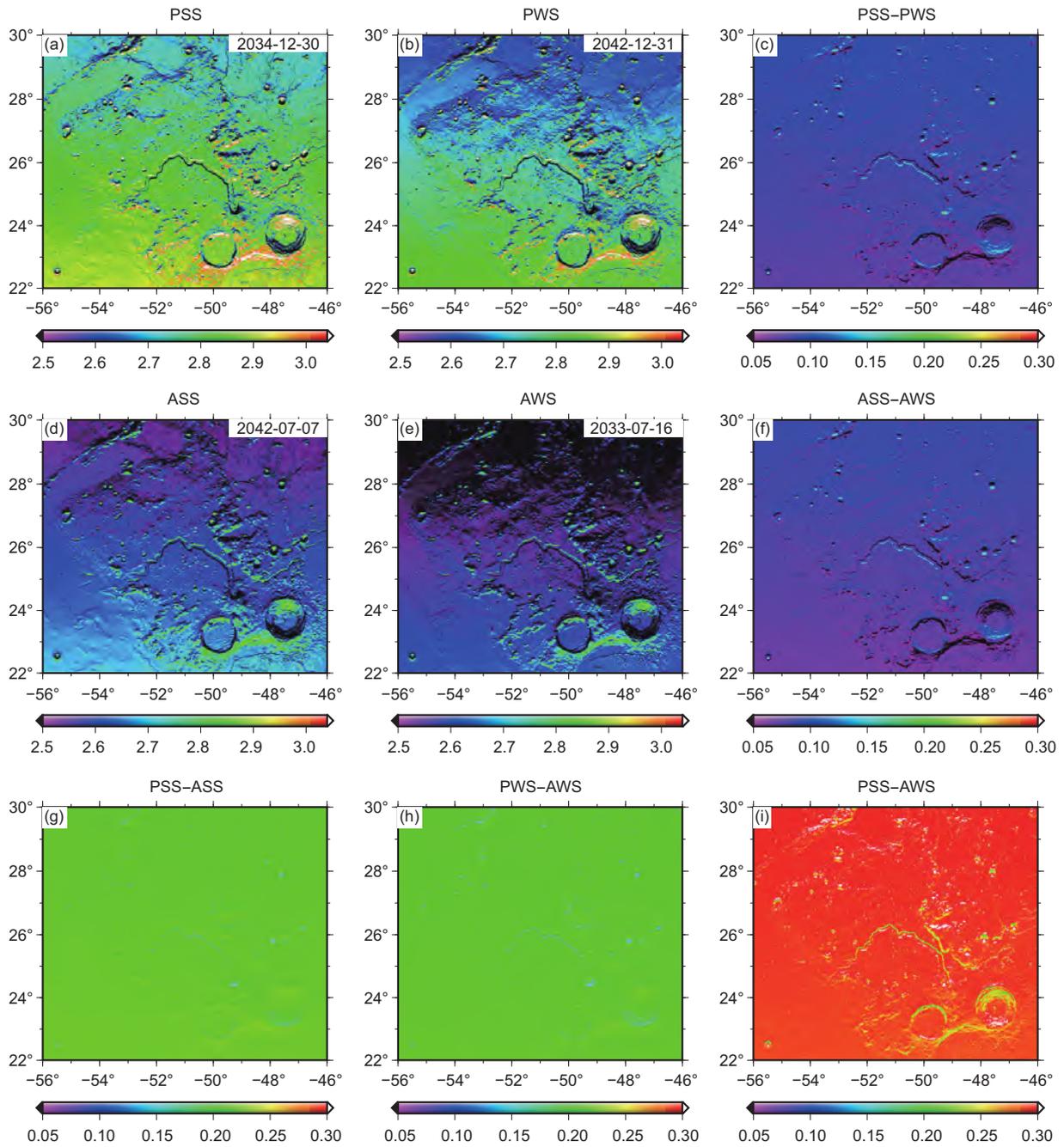


图7 (网络版彩图) Aristarchus地区正午时刻垂向电场强度分布(a) PSS, (b) PWS, (d) ASS, (e) AWS及垂向电场强度差值分布(c) PSS-PWS, (f) ASS-AWS, (g) PSS-ASS, (h) PWS-AWS, (i) PSS-AWS (单位:  $V m^{-1}$ )

Figure 7 (Color online) Distribution of vertical electric field at (a) PSS, (b) PWS, (d) ASS, (e) AWS and distribution of vertical electric field difference from (c) PSS-PWS, (f) ASS-AWS, (g) PSS-ASS, (h) PWS-AWS, (i) PSS-AWS at noon in the Aristarchus region (unit:  $V m^{-1}$ ).

出了PSS-ASS和PWS-AWS得出的 $\Delta\phi_s$ 和 $\Delta E_s$ , 指示在不同的季节, 日月距离对平衡表面电势和垂向电场强度的影响; 而图6和7中(i)则分别给出了季节和日月距

离对Aristarchus地区正午时刻平衡表面电势和垂向电场强度的叠加影响, 即PSS-AWS. 下面以电场强度的分布特征为例进行分析.

图 7(c)和(f)中,  $\Delta E_s$ 分布范围分别为 $-0.17\sim 3.59$ 和 $-0.16\sim 3.54 \text{ V m}^{-1}$ , 平均值分别为 $84$ 和 $77 \text{ mV m}^{-1}$ ; (g)和(h)中 $\Delta E_s$ 分布范围分别为 $0\sim 0.24$ 和 $0\sim 0.23 \text{ V m}^{-1}$ , 平均值分别为 $210$ 和 $204 \text{ mV m}^{-1}$ . 由此可知, 日月距离对电场强度的影响显著大于季节的影响, 而夏至与冬至之间的 $\Delta E_s$ 分布范围更大的原因在于太阳辐照区域随太阳高度角发生局部改变. 对于季节和日月距离对Aristarchus地区正午时刻电场强度的叠加影响, 电场强度的最大变化量为 $3.59 \text{ V m}^{-1}$ , 但 $\Delta E_s$ 平均值仅为 $288 \text{ mV m}^{-1}$ . 图 8中给出了图 7(c)和(f)–(i)中 $\Delta E_s$ 的箱状图分布, 红色圆圈表示 $\Delta E_s$ 的平均值. 由图可知, 尽管存在一些异常点, 但是5组 $\Delta E_s$ 分布均相对集中, 且日月距离的影响(PSS–ASS和PWS–AWS)比季节的影响(PSS–PWS和ASS–AWS)更显著. 此外, 我们计算了2025年1月1日至2045年12月31日期间, Aristarchus地区所有正午时刻的电场强度分布, 详见附件二.

#### 4 讨论

根据图 4可知, 位于月球中低纬的Aristarchus地区可接受充足的太阳辐照, 正午时刻不存在地形之间的

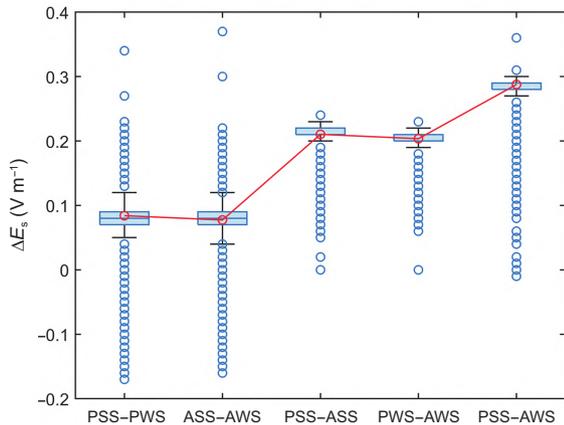


图 8 (网络版彩图) Aristarchus地区正午时刻垂向电场强度差值的箱状分布图. 蓝色方框的上下边界则分别指示 $\Delta E_s$ 的上四分位和下四分位, 方框中的水平线表示 $\Delta E_s$ 的中位数. 红色的圆圈表示 $\Delta E_s$ 的平均值

Figure 8 (Color online) Distribution of vertical electric field difference at noon in the Aristarchus region. The top and the bottom of the blue box denote the third quartile and the first quartile of  $\Delta E_s$ , respectively. While, the horizontal line drawn in the middle of the blue box denotes the median of  $\Delta E_s$ . The red circles show the average of  $\Delta E_s$ .

相互遮挡, 但局部地区存在自身遮蔽效应. 除了日月距离和季节的影响, 该区域的光照环境和地形呈现良好的对应关系, 特别是撞击坑南部坑沿外侧、北部坑壁、月溪北部溪壁, 由于地形坡度影响, 其接受的有效太阳辐照度比其他区域最大可高出约 $150 \text{ W m}^{-2}$ . 对于特殊地形(包括撞击坑、月溪等)之外的相对平坦区域, 纬度效应的影响占主导,  $22^\circ\sim 30^\circ\text{N}$ 之间区域的有效太阳辐照度差异可达约 $50 \text{ W m}^{-2}$ . 根据图 4(g)和(h)可知, 由于日月距离变化,  $\Delta I_s$ 平均约 $75 \text{ W m}^{-2}$ , 而根据图4(c)和(f)可知, 月球自转导致的季节变化产生的 $\Delta I_s$ 平均约 $29 \text{ W m}^{-2}$ . 即地形和日月距离对 $I_s$ 的影响比纬度效应( $22^\circ\sim 30^\circ\text{N}$ )和季节的影响更显著. 正午时刻, Aristarchus地区的阴影区随季节发生变化, 但是由于本研究中选择的4个时间点, 其太阳直射点的经度存在差异, 因此季节对阴影区的影响不做深入探讨.

图 6和7是基于Stubbs等人<sup>[20]</sup>的分析模型得出的Aristarchus地区平衡表面电势和垂向电场强度分布特征. 在典型的空间等离子体环境中, 不考虑水平电场的情况下, 该区域平衡表面电势和垂向电场强度分布特征与有效太阳辐照度分布特征呈良好的一致性, 均表现出地形和日月距离对 $\phi_s$ 和 $E_s$ 的影响比纬度效应( $22^\circ\sim 30^\circ\text{N}$ )和季节的影响更显著. 以电场强度为例, 近日点与远日点之间的 $\Delta E_s$ 的平均值约为 $0.2 \text{ V m}^{-1}$ ; 夏至与冬至之间的 $\Delta E_s$ 的平均值约为 $0.08 \text{ V m}^{-1}$ ; 纬度效应引起的 $\Delta E_s$ 介于两者之间, 约为 $0.15 \text{ V m}^{-1}$ ; 而地形引起的 $\Delta E_s$ 的平均值可高达 $0.4 \text{ V m}^{-1}$ . 特别是, 在撞击坑南部坑壁、北部坑沿外侧、月溪南部溪壁等这些有效太阳辐照度略低的区域, 其电场强度均小于 $2.5 \text{ V m}^{-1}$  (黑色区域), 甚至为负. 这些电场强度较小甚至为负的区域与其邻近区域之间可形成较强的水平电场, 有助于月表尘埃迁移. 此外, 需要注意的是, 地形遮挡产生的阴影区会随季节发生改变,  $\phi_s$ 和 $E_s$ 亦随之变化.

对比图4, 6和7发现, 有效太阳辐照度、平衡表面电势和垂向电场强度的分布特征呈良好的一致性. 这是因为 $I_s$ ,  $\phi_s$ 和 $E_s$ 随着 $D_{sm}$ ,  $\beta_s$ 或 $\chi$ 变化, 且呈现出相同的变化趋势. 根据式(4), (8), (11)和式(15), (16)可知,  $I_s$ ,  $\phi_s$ 和 $E_s$ 都是 $D_{sm}$ ,  $\beta_s$ 或 $\chi$ 的函数, 且 $\beta_s$ 和 $\chi$ 之间的关系满足 $\beta_s + \chi = \pi/2$ . 正午时刻, Aristarchus地区99.99%以上的区域均能接受太阳辐照, 以光照区为例, 比如, 随着 $\beta_s$ 的增加,  $I_s$ ,  $\phi_s$ 和 $E_s$ 均增大; 随着 $D_{sm}$ 的增加,  $I_s$ ,

$\phi_s$ 和 $E_s$ 均减小. 图9给出了近日点夏至(PSS)时的有效太阳辐照度和平衡表面电势散点图. 由图可知, 两者之间呈现良好的函数对应关系.

除了大尺度的地形影响, 月表石块对月表电场分布也存在一定的影响. 由于月表光照区的静电场作用范围, 即德拜鞘高度, 通常小于1 m. Bandfield等人<sup>[23]</sup>基于LRO的Diviner数据反演了月球60°N/S范围内暴露在表面且直径大于1 m的石块含量. 图10为Aristarchus地区的月表石块含量分布. 在高原东南部的Aristarchus撞击坑及其周围(小于1个撞击坑半径)区域石块含量在0.02–0.05之间. 此外, 在高原中间区域的Schröteri月溪附近石块含量也很高. 在Aristarchus地区的西南角和西北角石块含量局部升高, 介于0.01–0.02之间. 高原其他区域的石块含量较低, 均在0.01以下. 相比月壤, 石块具有较大的热惯量, 其对太阳辐射的变化响应较慢, 即石块含量高的区域温度昼夜波动小. 此外, 暴露在月表的石块也会增加形貌的复杂度, 随光照角度变化会产生不同大小范围的阴影区域, 使月面电场环境变得更加复杂. 在此不做深入讨论.

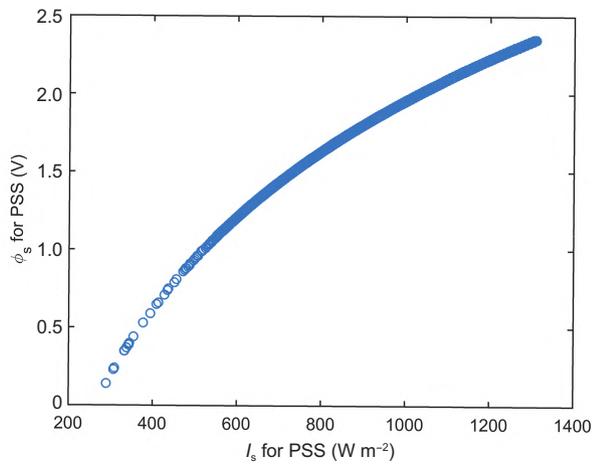


图9 (网络版彩图) Aristarchus地区近日点夏至时的有效太阳辐照度和平衡表面电势散点图

Figure 9 (Color online) Effective solar irradiance and equilibrium surface potential at the perihelion summer solstice in the Aristarchus region.

## 补充材料

本文的补充材料见网络版physcn.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

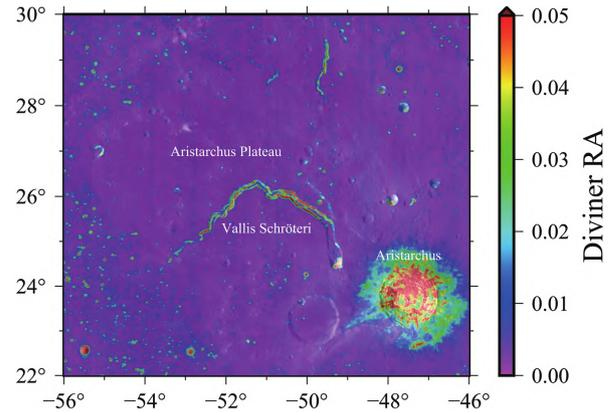


图10 (网络版彩图) Aristarchus地区月表石块含量, 底图为LRO WAC影像. 石块数据基于LRO Diviner数据反演得到<sup>[23]</sup>. 该图基于JMARS软件得到

Figure 10 (Color online) Rock concentration values with the LRO WAC optical image in the Aristarchus region. The rock data are obtained by inverting LRO Diviner data<sup>[23]</sup>. The figure is based on JMARS software.

## 5 结论

本文基于日月系统的星历参数拟合了2025–2045年之间月球赤纬和日月距离的变化曲线, 并选择了Aristarchus地区处于近日点夏至/冬至、远日点夏至/冬至的4个时间点, 结合高精度数字高程模型(SLDDEM2015)得到的月表坡度和方位角数据, 计算了4个时间点研究区正午时刻的有效太阳辐照度、平衡表面电势和垂向电场强度. 研究表明, 有效太阳辐照度、平衡表面电势和电场强度的分布特征具有良好的 consistency, 地形特别是撞击坑和月溪的影响最大, 但对于地形平坦的区域, 日月距离和纬度的影响较为突出, 季节的影响显著小于日月距离的影响. 但是, 值得注意的是, 随着季节的变化, 太阳辐照区域会发生局部变化, 因此局部区域的有效太阳辐照度、平衡表面电势和垂向电场强度可能具有较大的变化尺度, 这种现象在中高纬地区会更加显著. 此外, 遍布月面的石块对有效太阳辐照度、平衡表面电势和垂向电场强度也有影响, 有待进一步研究.

## 参考文献

- 1 Bussey D B J, Lucey P G, Steutel D, et al. Permanent shadow in simple craters near the lunar poles. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1278
- 2 Li X Y, Wang S J, Cheng A Y. A lunar surface effective solar irradiance real-time model (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2008, 51: 25–30 [李雄耀, 王世杰, 程安云. 月表有效太阳辐照度实时模型. *地球物理学报*, 2008, 51: 25–30]
- 3 Zhang J D, Meng Z G, Ping J S, et al. Preliminary study of illumination characteristics of Aristarchus plateau using LOLA data (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2017, 4: 171–177 [张吉栋, 孟治国, 平劲松, 等. 基于LOLA数据的Aristarchus高原光照特性初步研究. *深空探测学报*, 2017, 4: 171–177]
- 4 Gan H, Li X Y, Wei G F. Numerical simulation of effective solar irradiance and temperatures at simple crater of lunar dayside (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 069601 [甘红, 李雄耀, 魏广飞. 月表光照区简单陨坑的有效太阳辐照度和温度的数值模拟. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49: 069601]
- 5 Gan H, Li X Y, Wei G F. Electric fields distribution of Zhinyu Crater in Chang'e-4 landing area (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2020, 40: 250–263 [甘红, 李雄耀, 魏广飞. 嫦娥四号着陆区织女陨坑电场环境数值模拟. *空间科学学报*, 2020, 40: 250–263]
- 6 Gaier J R. The effects of lunar dust on EVA systems during the Apollo missions. NASA Technical Rept. 2005, NASA/TM-2005-213610
- 7 Gaier J R, Jaworske D A. Lunar dust on heat rejection system surfaces: Problems and prospects. *AIP Conf Proc*, 2007, 880: 27–34
- 8 Zakharov A V, Zelenyi L M, Popel' S I. Lunar dust: Properties and potential hazards. *Sol Syst Res*, 2020, 54: 455–476
- 9 Meyers V E, García H D, Monds K, et al. Ocular toxicity of authentic lunar dust. *BMC Ophthalmol*, 2012, 12: 26
- 10 Lam C, Scully R R, Zhang Y, et al. Toxicity of lunar dust assessed in inhalation-exposed rats. *Inhalation Toxicol*, 2013, 25: 661–678
- 11 Williams J P, Greenhagen B T, Paige D A, et al. Seasonal polar temperatures on the Moon. *J Geophys Res Planets*, 2019, 124: 2505–2521
- 12 Barker M K, Mazarico E, Neumann G A, et al. A new lunar digital elevation model from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and SELENE Terrain Camera. *Icarus*, 2016, 273: 346–355
- 13 Araki H, Tazawa S, Noda H, et al. Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimetry. *Science*, 2009, 323: 897–900
- 14 Haruyama J, Hara S, Hioki K, et al. Lunar global digital terrain model dataset produced from SELENE (Kaguya) terrain camera stereo observations. In: *Lunar and Planetary Science Conference*. Woodlands, 2012. 1200
- 15 Connolly J F. Constellation program overview. NASA Presentation, 2006
- 16 Wang T M, Zhao J N, Huang Q. The Gardner volcanic complex on the Moon: Geological characteristics and its volcanic history (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 049601 [王太茂, 赵健楠, 黄倩. 月球Gardner火山区地质特征及其火山活动历史. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49: 049601]
- 17 Ling Z C, Zhang J, Wu Z C, et al. The compositional distribution and rock types of the Aristarchus region on the Moon (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2013, 43: 1403–1410 [凌宗成, 张江, 武中臣, 等. 月球Aristarchus地区的物质成分与岩石类型分布. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43: 1403–1410]
- 18 McEwen A S, Robinson M S, Eliason E M, et al. Clementine observations of the Aristarchus region of the Moon. *Science*, 1994, 266: 1858–1862
- 19 Aharonson O, Schorghofer N. Subsurface ice on Mars with rough topography. *J Geophys Res*, 2006, 111: E11007
- 20 Stubbs T J, Farrell W M, Halekas J S, et al. Dependence of lunar surface charging on solar wind plasma conditions and solar irradiation. *Planet Space Sci*, 2014, 90: 10–27
- 21 Farrell W M, Stubbs T J, Halekas J S, et al. Anticipated electrical environment within permanently shadowed lunar craters. *J Geophys Res*, 2010, 115: E03004
- 22 Xie L, Zhang X, Li L, et al. Lunar dust fountain observed near twilight craters. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e89593
- 23 Bandfield J L, Ghent R R, Vasavada A R, et al. Lunar surface rock abundance and regolith fines temperatures derived from LRO Diviner Radiometer data. *J Geophys Res*, 2011, 116: E00H02

## Real-time simulation of effective solar irradiance and electric field on the Aristarchus region based on SLDEM2015 data

GAN Hong<sup>1,2,3\*</sup>, WEI GuangFei<sup>3,4</sup>, WANG JunTao<sup>3</sup>, ZENG XiaoJia<sup>3</sup>, LI XiongYao<sup>3,4</sup>,  
LIU JianZhong<sup>3,4</sup> & ZHANG XiaoPing<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Analyzing and Testing Center, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China;

<sup>3</sup>Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

<sup>4</sup>Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China

Taking the Aristarchus region on the Moon as an example, the slope and azimuth of the lunar surface obtained from the high-precision digital elevation model (SLDEM2015) would be used to calculate the effective solar irradiance at noon from 2025 to 2045 when the Aristarchus region is at the perihelion summer/winter solstice and aphelion summer/winter solstice. Second, based on the current balance theory, the equilibrium surface potential and the vertical electric field are calculated. The results show that the topography, lunar latitude, Sun-Moon distance, and seasons have important effects on the distribution characteristics of effective solar irradiance, equilibrium surface potential, and vertical electric field. In addition, it is found that the distance between the Sun and the Moon has a considerable influence on the effective solar irradiation, equilibrium surface potential, and electric field than the seasonal variation. This can provide some support and basis for the time selection of unmanned and manned lunar exploration missions, simulation of landing site environment characteristics, use of solar energy, and early warning and prediction of lunar dust environment.

**Moon, Aristarchus region, effective solar irradiance, electric field**

**PACS:** 94.05.Bf, 95.55.Pe, 96.12.Wx, 96.60.Ub

**doi:** 10.1360/SSPMA-2021-0122